ISSN 2786-7102 (Online), ISSN 2786-7633 (Print)
https://doi.org/10.15407/srenergy2024.01.027

УДК (620.9+621.3):519.852

Анатолій Замулко*, канд. техн. наук, доцент, https://orcid.org/0000-0001-8018-6332
Юлія Чернецька, канд. техн. наук, https://orcid.org/0000-0001-6821-3211
Антон Прасол, https://orcid.org/0009-0009-2743-3301
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Берестейський просп., 37, м. Київ, 03056, Україна
*Автор-кореспондент: zamulko.anatolii@lll.kpi.ua

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНИХ ВЕЛИЧИН СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ЗАСОБАМИ ОПТИМІЗАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Анотація. *В опалювальному сезоні 2022/2023 років, внаслідок військової агресії Російської Федерації та цілеспрямованих атак об'єктів електроенергетики, в об'єднаній енергосистемі України виник значний дефіцит електричної енергії. Вимушено застосовувалися графіки обмеження та аварійного відключення споживачів. В умовах такого безпрецедентного порушення безпеки постачання електричної енергії, для учасників ринку електричної енергії набула нової актуальності проблема визначення граничних величин споживання електричної енергії та потужності. У даному дослідженні поставлено і розв'язано задачу визначення оптимальних граничних величин споживання електричної енергії за критерієм максимального доходу від її продажу трьом групам споживачів: «Критична інфраструктура», «Побут» та «Непобутові споживачі». Формування трьох зазначених груп пов'язане з ціновою дискримінацією на ринку електричної енергії та необхідністю в повному обсязі забезпечити електропостачання об'єктів критичної інфраструктури. Шукані невідомі в оптимізаційній моделі запропоновано задати частками забезпечення потреб в електричній енергії (у долях від одиниці), що дозволяє встановити рівні умови щодо обмежень для всіх операторів систем розподілу. Для врахування соціальної значущості електричної енергії як товару у базову оптимізаційну модель введено додаткове обмеження: нижню границю шуканої частки для групи «Побут». Апробацію запропонованої оптимізаційної моделі здійснено засобами електронно-табличного моделювання в середовищі MS Excel на звітних даних про результати вимірів електричного навантаження в режимні дні. Наведено результати обчислювальних експериментів для умов різних значень дефіциту електричної енергії в об'єднаній енергосистемі України та різних значень додаткового обмеження для групи «Побут», зокрема кількісні оцінки наслідків введених обмежень для функціонування ринку електричної енергії. Запропонований спосіб визначення граничних величин споживання електричної енергії дозволяє формалізувати процедуру прийняття управлінських рішень за наперед визначеними правилами і тим самим досягти справедливого розподілу обмеженого ресурсу.*

Ключові слова: споживання електричної енергії, дефіцит, гранична величина, оптимізаційне моделювання, електронно-таблична модель.

1. Вступ

Запровадження ринку електричної енергії в Україні поставило на перший план питання безпеки постачання – спроможності електроенергетичної галузі забезпечувати потреби споживачів в електричній енергії. Згідно з положеннями Закону України «Про ринок електричної енергії» [1] функціонування ринку здійснюється на принципах забезпечення безпеки постачання електричної енергії споживачам, захисту їхніх прав та інтересів. Розроблено правила про безпеку постачання електричної енергії [2], що обов'язково мають враховувати економічний вплив заходів, які вживатимуться у разі порушення безпеки постачання, їх ефективність та наслідки для функціонування ринку електричної енергії.

Ці правила відносять до порушень безпеки постачання і відключення та/або пошкодження електроустановок, у тому числі внаслідок дії третіх осіб, що призвели до обмеження споживання електричної енергії. Для подолання порушень безпеки постачання електричної енергії та запобігання системній аварії в об'єднаній енергетичній системі України (ОЕС України) можуть застосовуватися графіки обмеження споживання електричної енергії та потужності, аварійного відключення споживачів [3]. Водночас оператор системи передачі (ОСП), що здійснює диспетчерське управління режимами роботи ОЕС України, визначає граничні величини споживання електричної енергії та потужності на рівні операторів систем розподілу (ОСР).

Примусові обмеження споживання електричної енергії в ОЕС України вимушено застосовувалися і в минулому: у зв'язку із нестачею палива на електростанціях у 90-х роках [4], для подолання кризи неплатежів початку 2000-х [5], через дисбаланс обсягів виробництва і споживання в опалювальному сезоні 2014/2015 років [6]. У наукових публікаціях наголошується, що в ринкових умовах функціонування електроенергетичної галузі України необхідно впроваджувати економічні механізми управління попитом [7], застосовувати тарифи на переривання [8], забезпечувати управління попитом в режимі, близькому до реального часу [9]. Проте в опалювальному сезоні 2022/2023 років, коли внаслідок військової агресії Російської Федерації та цілеспрямованих атак об'єктів електроенергетики дефіцит електричної енергії, за оцінками Національного банку України, наприкінці 2022 року складав 23 % і за песимістичним сценарієм міг сягати 40 % [10], погодинним відключенням споживачів знову не було альтернативи.

Задача визначення граничних величин споживання електричної енергії та потужності на рівні ОСР набула нової актуальності. По-перше, її розв'язання мало б враховувати нагальні вимоги правил про безпеку постачання електричної енергії, зокрема, мінімізувати негативні наслідки для функціонування ринку. По-друге, застосування примусових обмежень у споживанні такого соціально значущого товару як електрична енергія потребує формалізованих процедур прийняття рішень – зрозумілих та однакових правил, що визнаватимуться усіма учасниками ринку.

У статті [11] запропоновано метод розподілу енергоресурсу між споживачами в умовах дефіцитної енергосистеми, який ґрунтується на ранжуванні споживачів за співвідношенням між збитками від недоотримання ресурсу та обсягом заявки. Напряму даний метод не може бути застосований на рівні ОЕС України, бо кожен ОСР зацікавлений у завищуванні обсягу власної заявки. Проте видається важливим врахування величини збитків від недоотримання електричної енергії різними групами споживачів.

Сучасні наукові методи прийняття рішень широко застосовують кількісні оцінки та математичне моделювання. Це дозволяє розглядати прийняття рішення як логічну послідовність кроків: (1) ідентифікувати та кількісно описати проблему, (2) визначити альтернативні рішення (розв'язки), (3) визначити один або декілька критеріїв, за якими оцінюватимуться альтернативи, (4) оцінити альтернативи, (5) вибрати одне з альтернативних рішень [12]. За умови наявності адекватних початкових даних досліджувана проблема може бути представлена у вигляді оптимізаційної задачі, що досить успішно розв'язується за допомогою електронно-табличних моделей MS Excel [12–15]. Важливою перевагою оптимізаційного моделювання на цій платформі є можливість обчислювальних експериментів у форматі «Що-якщо…» та дослідження впливу на розв'язок задачі зміни заданих початкових даних [16].

Метою роботи є постановка і розв'язання задачі визначення граничних величин споживання електричної енергії засобами оптимізаційного моделювання, що завдяки аналізу чутливості знайденого розв'язку до зміни початкових даних дозволить формалізувати процедуру прийняття рішень за наперед встановленими правилами.

2. Методи та матеріали

Структурування проблеми. З точки зору кількісної оцінки наслідків запровадження граничних величин споживання для функціонування ринку електричної енергії об'єктивним показником є дохід від її продажу. Тарифи для побутових споживачів в Україні значно нижчі, ніж для непобутових, тож

ця цінова дискримінація [17] має бути відображена в оптимізаційній моделі. Крім того, серед споживачів є об'єкти критичної інфраструктури, яких не можна обмежувати у споживанні навіть в умовах дефіциту, з огляду на їх суспільну значущість. Таким чином, граничну величину споживання електричної енергії доцільно розглядати як суму граничних величин споживання трьох окремих груп споживачів: «Критична інфраструктура», «Побут» та «Непобутові споживачі».

Дослідження наявних початкових даних. Дані про обсяги добового споживання електричної енергії періодично фіксуються як на рівні ОЕС України, так і на рівні окремих ОСР під час обов'язкових вимірів електричного навантаження в режимний день [18]. Таких характерних режимних днів два – в літньому (середина липня) і зимовому (середина грудня) періодах. За результатами проведених вимірів формуються звіти погодинного споживання електричної енергії у розрізі шести груп споживачів: I. Промисловість; II. Сільгоспспоживачі; III. Транспорт; IV. Будівництво; V. Комунальне господарство; VI. Освітлення, побутове навантаження, навантаження споживачів, що не брали участь у вимірах (VI. Світло, побут та інші сп.).

У даному дослідженні використовувалися дані режимних вимірів 2019–2021 років, узагальнені для адміністративних областей та України в цілому. Добові обсяги споживання електричної енергії зазначених нормативних груп споживачів у характерний день зимового періоду (рис. 1) є досить стабільними із року в рік. Звичайно, протягом 2022–2023 років в ОЕС України відбулися зміни в споживанні електричної енергії, зокрема пов'язані з міграцією населення та релокацією частини промислових виробництв. Але саме за даними режимних вимірів є можливість кількісно оцінити споживання електричної енергії та потужності різними групами споживачів на території обслуговування ОСР у нормальному режимі роботи енергосистеми, тобто за відсутності дефіциту.

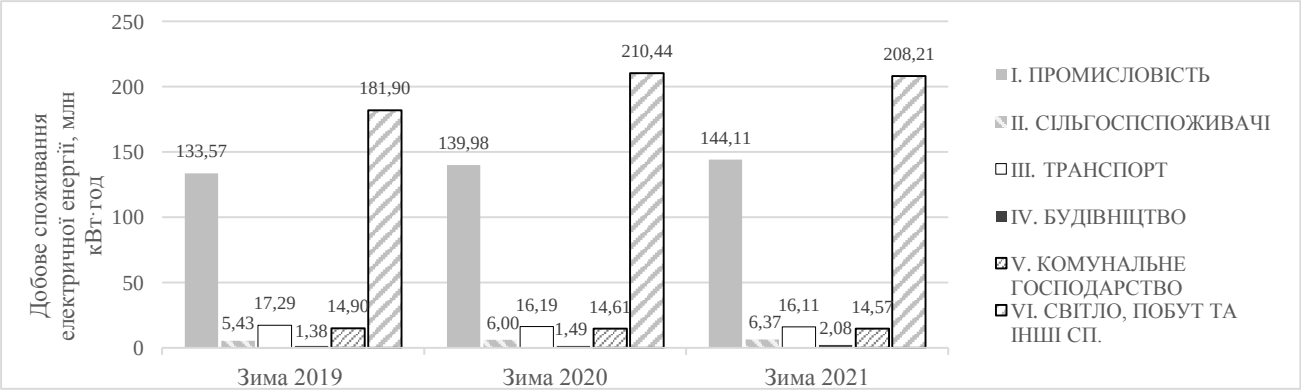

Рисунок 1. Добове споживання електричної енергії у розрізі нормативних груп споживачів (за даними режимних вимірів зими 2019–2021 років)

Для визначення граничних величин споживання електричної енергії пропонується перейти до трьох груп (табл. 1), припустивши, що електроспоживання групи «Критична інфраструктура» відповідає групі V, «Побут» – групі VI, «Непобутові споживачі» – сумі споживання груп I–IV.

Таблиця 1. Добове споживання електричної енергії у розрізі груп споживачів, млн кВт·год.

Нормативні групи споживачів	V. Комунальне господарство	VI. Світло, побут та інші споживачі	I. Промисловість + II. Сільгосп-споживачі + III. Транспорт + IV. Будівництво
Нові групи / Режимний день сезону	«Критична інфраструктура» ↓	«Побут» ↓	«Непобутові споживачі» ↓
Зима 2019	14,94	181,89	157,63
Зима 2020	14,61	210,44	163,70
Зима 2021	14,57	208,21	168,70

Формулювання оптимізаційної моделі. Оптимізаційну модель розроблено на базі апарату класичного лінійного програмування, що використовується для задач оптимального розподілу обмежених ресурсів. Разом із тим враховано наявні початкові дані та специфіку кількісної оцінки

наслідків запровадження граничних величин споживання для функціонування ринку електричної енергії. Визначимо складові запропонованої оптимізаційної моделі – шукані невідомі, цільову функцію, обмеження та граничні умови.

Шукані невідомі: $X = (x_0; x_1; x_2)$ – частки забезпечення потреби в електричній енергії (у долях від одиниці) трьох груп споживачів – «Критична інфраструктура», «Побут» та «Непобутові споживачі», тобто відношення граничної величини споживання групи до обсягу її споживання за відсутності дефіциту.

Цільова функція – сукупний дохід від продажу електричної енергії трьом групам споживачів (у млн грн):

$$Z(X) = a_0c_0x_0 + a_1c_1x_1 + a_2c_2x_2 \rightarrow \max, \quad (1)$$

де c_1 – ціна електричної енергії для групи «Побут», грн/МВт·год.; $c_0 = c_2$ – середньозважена ціна електричної енергії для груп «Критична інфраструктура» та «Непобутові споживачі», грн/МВт·год; a_0, a_1 та a_2 – обсяги споживання електричної енергії в умовах відсутності дефіциту для кожної з трьох груп споживачів відповідно, млн МВт·год.

У базовій оптимізаційній моделі враховано *основні обмеження*, пов'язані із прогнозованим обсягом вироблення електричної енергії протягом доби, B, млн МВт·год. (2), та обсягами споживання окремих груп на рівні ОЕС України за відсутності дефіциту (3)–(5):

$$a_0x_0 + a_1x_1 + a_2x_2 \le B, \quad (2)$$

$$a_0x_0 = a_0, \quad (3)$$

$$a_1x_1 \le a_1, \quad (4)$$

$$a_2x_2 \le a_2. \quad (5)$$

Граничні значення шуканих невідомих: $0 \le x_1 \le 1$ та $0 \le x_2 \le 1$ для груп «Побут» та «Непобутові споживачі»; $x_0 = 1$, оскільки група «Критична інфраструктура» під час розподілу має бути забезпечена електричною енергією у повному обсязі.

У якості *додаткового обмеження* у базову модель також вводилася константа $x_{1\min}$ – нижня границя для шуканої змінної, що позначає частку забезпечення потреб групи «Побут»:

$$x_1 \ge x_{1\min}. \quad (6)$$

Реалізація оптимізаційного моделювання. Для обчислювальних експериментів було застосовано стандартну надбудову MS Excel – Розв'язувач (Solver), яка допомагає знайти розв'язок задач лінійного програмування за допомогою вбудованого алгоритму симплекс-методу.

3. Результати та їх обговорення

Апробація розробленої моделі на наявних наборах початкових даних. У якості початкових даних використано результати вимірів електричного навантаження в режимний день зими 2019 року, тобто відомі значення a_0, a_1 та a_2 для України в цілому (табл. 1) та для окремих адміністративних одиниць. Прийнято, що ціна електричної енергії (станом на 01.02.2023 р.) для групи «Побут» складає c_1 = 1,68 грн/кВт·год., середньозважена ціна електричної енергії для груп «Критична інфраструктура» та «Непобутові споживачі» складає $c_0 = c_2$ = 5 грн/кВт·год. Зроблено припущення про добовий дефіцит електричної енергії на рівні 25 %; тобто за потреби у 354,46 млн кВт·год. є можливість виробити 265,85 млн кВт·год. (табл. 2).

За даними про добове електроспоживання України, в цілому обчислено значення шуканих невідомих базової оптимізаційної моделі із врахуванням обмежень (2)–(5): X = (1; 0,51; 1), тобто потреби в електричній енергії груп «Критична інфраструктура» та «Непобутові споживачі» забезпечуються на 100 %, а потреби групи «Побут» – на 51 %. Максимум цільової функції, добовий дохід від продажу електричної енергії, дорівнює $Z(X) = Z(1; 0{,}51; 1)$ = 997,17 млн грн. Знайдені значення X використано для обчислення граничної величини електроспоживання для всіх адміністративних одиниць України, у табл. 2 (рядки – базова модель) наведено результати розрахунків для Вінницької, Полтавської та Чернігівської областей.

Якщо в оптимізаційну модель буде введено додаткове обмеження (6), наприклад, x_{1min} = 0,8, то шукані змінні набудуть значень X = (1; 0,8; 0,67), а значення цільової функції зменшиться на 18,65 %,

до 811,2 млн грн. Граничні величини споживання для адміністративних одиниць будуть перераховані (табл. 2, рядки – $x_{1min} = 0{,}8$). Порівняно з результатами обчислень за базовою моделлю, гранична величина споживання для Вінницької області залишиться на тому ж рівні, адже обсяги споживання груп «Побут» та «Непобутові споживачі» в цьому регіоні співмірні. У Чернігівській області, де споживання групи «Побут» переважає, введення додаткового обмеження (6) підвищить граничну величину споживання на 16 %, а у Полтавській області – навпаки, знизить на 9 %.

Таблиця 2. Визначення граничної величини добового електроспоживання для трьох адміністративних одиниць (припущення щодо дефіциту – 25 %)

Україна / Адміністративні одиниці	Добове електроспоживання (режимний день), млн кВт·год.				Гранична величина електроспоживання, млн кВт·год.			
	Усього	a_0	a_1	a_2	***B***	a_0x_0	a_1x_1	a_2x_2
Україна, базова модель	354,46	14,94	181,89	157,63	**265,85**	14,94	93,28	157,63
Україна, $x_{1min} = 0{,}8$					**265,85**	14,94	145,51	105,40
Вінницька обл., базова модель	9,07	0,19	4,69	4,19	**6,79**	0,19	2,41	4,19
Вінницька обл., $x_{1min} = 0{,}8$					**6,74**	0,19	3,75	2,80
Чернігівська обл., базова модель	5,46	0,22	3,73	1,51	**3,63**	0,22	1,9	1,51
Чернігівська обл., $x_{1min} = 0{,}8$					**4,22**	0,22	2,98	1,01
Полтавська обл., базова модель	15,18	0,23	6,19	8,76	**12,15**	0,23	3,16	8,76
Полтавська обл, $x_{1min} = 0{,}8$					**11,05**	0,23	4,95	5,87

Результати оптимізаційного моделювання за даними режимних вимірів зими 2020 та 2021 років відрізняються несуттєво, оскільки значення шуканих невідомих X обчислюються для сумарних обсягів електроспоживання в Україні і саме як частки від потреби в електричній енергії виділених груп.

Обчислювальні експерименти. Як було зазначено вище, важливою перевагою оптимізаційного моделювання є можливість дослідити вплив на розв'язок задачі зміни заданих початкових даних. У табл. 3 зведено результати обчислень шуканих невідомих x_1 та x_2 за умови дефіциту на рівні 10, 20, 30 та 40 % та при різних значеннях додаткового обмеження (6) щодо частки забезпечення потреб групи «Побут»: $x_{1min} = 0{,}4$; 0,6; 0,8 та 1,0.

Таблиця 3. Оптимальні частки забезпечення потреб груп «Побут» та «Непобутові споживачі» залежно від величини дефіциту електричної енергії та мінімальної частки для групи «Побут»

Дефіцит ЕЕ, %	**Групи**	**Базова модель**	**Мінімальна частка для групи «Побут»**			
			0,4	**0,6**	**0,8**	**1**
0	Побут	1	1	1	1	1
	Непобут	1	1	1	1	1
10	Побут	0,805	0,805	0,805	0,805	1
	Непобут	1	1	1	1	0,775
20	Побут	0,610	0,610	0,610	0,8	1
	Непобут	1	1	1	0,781	0,550
30	Побут	0,415	0,415	0,6	0,8	1
	Непобут	1	1	0,787	0,556	0,325
40	Побут	0,220	0,220	0,6	0,8	1
	Непобут	1	0,793	0,562	0,331	0,101

На рис. 2 показано відповідні зміни значення цільової функції – добового доходу від продажу електричної енергії. Пряма (1) відповідає базовій моделі, в якій пропорційно дефіциту в енергосистемі обмежується споживання групи «Побут». Прямі (2)–(5) ілюструють результати обчислювальних експериментів із додатковим обмеженням, аж до крайньої ситуації, коли потреби групи «Побут» забезпечуються на 100 %. Таким чином, обчислювальні експерименти дозволяють кількісно оцінити наслідки прийнятих управлінських рішень з точки зору зміни фінансових результатів роботи ринку електричної енергії.

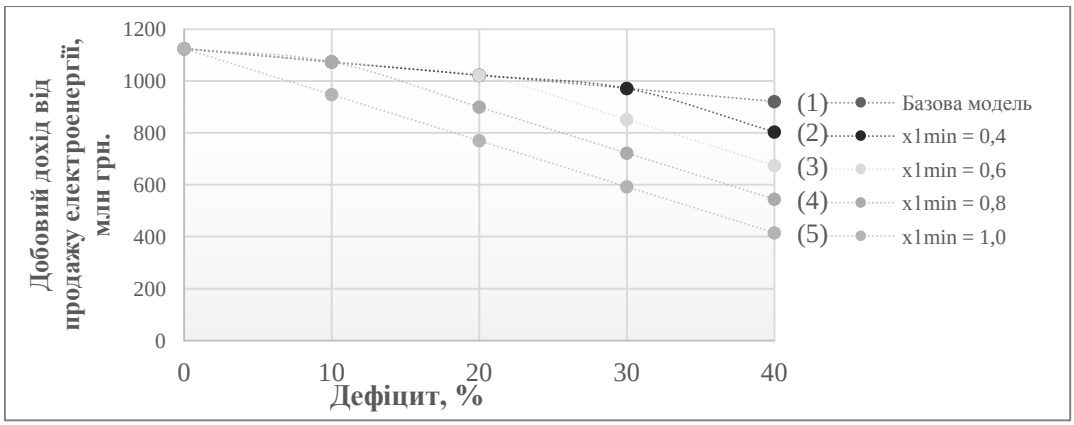

Рисунок 2. Залежність значення цільової функції від величини дефіциту та заданої мінімальної частки для групи «Побут»

4. Висновки

1. У роботі представлено постановку і розв'язання задачі визначення граничних величин споживання електричної енергії, в умовах її значного дефіциту, засобами оптимізаційного моделювання, що завдяки аналізу чутливості знайденого розв'язку до зміни початкових даних дозволяє формалізувати процедуру прийняття рішень за наперед встановленими правилами.

2. Оптимізаційна модель побудована з використанням наявних статистичних даних про споживання електричної енергії у розрізі основних груп споживачів, що періодично фіксуються та узагальнюються для адміністративних областей і України в цілому. Таким чином, її застосування не потребує тривалої підготовки початкових даних, проте результати розрахунків напряму залежатимуть від достовірності даних звітів про виміри електричного навантаження в режимний день.

3. Запропоновано використовувати максимум доходу від продажу електричної енергії в якості критерію оптимізації, що дозволяє врахувати основні ринкові принципи діяльності енергетичної галузі, навіть в умовах, коли кризові явища перешкоджають ринковій рівновазі. У такій постановці оптимізаційна задача існує, поки на ринку електричної енергії зберігається цінова дискримінація.

4. Результати апробації розробленої моделі на різних наборах початкових даних підтвердили її коректність. Звичайно, будь-яка модель суттєво спрощує реальність, проте і допомагає кількісно обґрунтовувати прийняті рішення, діяти, керуючись однаковими правилами щодо учасників ринку.

Посилання

1. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 р. № 2019-VIII: станом на 01.01.2024 р. *База даних «Законодавство України»*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text (дата звернення: 02.01.2024).
2. Про затвердження Правил про безпеку постачання електричної енергії: Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 27.08.2018 р. № 448: станом на 28.10.2022 р. *База даних «Законодавство України»*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1076-18#Text (дата звернення: 02.01.2024).
3. Про затвердження Інструкції про складання і застосування графіків обмеження та аварійного відключення споживачів, а також протиаварійних систем зниження електроспоживання: Наказ Міністерства палива та енергетики України від 23.11.2006 р. № 456: станом на 26.04.2022 р. *База даних «Законодавство України»*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0151-07#Text (дата звернення: 02.01.2024).
4. Про затвердження Тимчасового порядку відпуску електричної енергії в умовах дефіциту паливно-енергетичних ресурсів: Постанова Кабінету Міністрів України від 08.11.1996 р. № 1361. *База даних «Законодавство України»*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1361-96-%D0%BF#Text (дата звернення: 02.01.2024).
5. Про невідкладні заходи щодо стабілізації фінансового становища підприємств електроенергетичної галузі: Постанова Кабінету Міністрів України від 24.03.1999 р. № 441. *База даних «Законодавство України»*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/441-99-%D0%BF/conv#o65 (дата звернення: 02.01.2024).
6. Про затвердження Порядку вжиття тимчасових надзвичайних заходів з подолання наслідків тривалого порушення нормальної роботи ринку електричної енергії: Постанова Кабінету Міністрів України від 13.08.2014 р. № 372. *База даних «Законодавство України»*. URL: http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/372-2014-п (дата звернення: 02.01.2024).

7. Лір В., Биконя О. Економічні механізми управління попитом на ринку електроенергії. *Економіст*. 2015. № 2. С. 9—13. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/econ_2015_2_3 (дата звернення: 02.01.2024).
8. Замулко А.І., Іщенко О.С. Особливості використання тарифів на переривання в умовах ринку електричної енергії України. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2021. № 1. С. 98—107. https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2021.242187
9. Коцар О., Расько Ю. Вдосконалення методичного та інструментального забезпечення управління попитом в лібералізованих ринках електричної енергії. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 3. С. 68—79. https://doi.org/10.15407/techned2023.03.068
10. Інфляційний звіт. Січень 2023. *Національний банк України*. URL: https://bank.gov.ua/admin_uploads/article/IR_2023-Q1.pdf?v=4 (дата звернення: 02.01.2024).
11. Калінчик В.П., Розен В.П., Скачок А.В. Метод розподілу енергоресурсу між споживачами. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету*. 2012. Вип. 25(2). С. 52—57. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkntu_2012_25(2)__11 (дата звернення: 02.01.2024).
12. Camm J.D., Cochran J.J., Fry M.J., Ohlmann J.W., Anderson D.R., Sweeney D.J., Williams T.A. An Introduction to Management Science: Quantitative Approaches to Decision Making. 16th edition. Cengage Learning, 2023. 788 p.
13. Кузьмичов А.І. Оптимізаційні методи та моделі. Моделювання засобами MS Excel: навчальний посібник. К.: Видавництво Ліра-К, 2021. 215 с.
14. Ragsdale C.T. Spreadsheet Modeling and Decision Analysis: a Practical Introduction to Business Analytics, ninth edition. Cengage Learning Inc., 2022. 908 p.
15. Baker K. R. Optimization Modeling with Spreadsheets. Third edition. John Wiley & Sons, 2016. 356 p.
16. Кузьмичов А.І., Чернецька Ю.В., Шестаков В.А. Пошук та аналіз чутливості часових оптимальних планів постачання енергетичних ресурсів із застосуванням надбудови SolverTable. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2022. Том 24. № 2. С. 62—71. https://doi.org/10.35681/1560-9189.2022.24.2.275103
17. Мороз С.В., Зима В.М. Цінова дискримінація на ринку електроенергії України. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Економічні науки*. 2021. № 6. Том 1. С. 163—171. https://doi.org/10.31891/2307-5740-2021-300-6-27
18. Про затвердження Порядку організації проведення вимірів електричного навантаження в режимний день: Наказ Міністерства палива та енергетики України від 15.01.2008 р. станом на 06.04.2023 р. *База даних «Законодавство України»*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0084-08#Text (дата звернення: 02.01.2024).

References

1. On the electric energy market: Law of Ukraine, dated 04.13.2017 No. 2019-VIII: as of 01.01.2024. *Database "Legislation of Ukraine"*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text (Last accessed: 02.01.2024) [in Ukrainian].
2. On the approval of the Rules on the safety of electric energy supply: Order of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine, dated 27.08.2018 No. 448: as of 28.10.2022. *Database "Legislation of Ukraine"*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1076-18#Text (Last accessed: 02.01.2024) [in Ukrainian].
3. On the approval of the Instructions on drawing up and applying schedules of restriction and emergency disconnection of consumers, as well as anti-emergency systems for reducing electricity consumption: Order of the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, dated 23.11.2006 No. 456: as of 26.04.2022. *Database "Legislation of Ukraine"*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0151-07#Text (Last accessed: 02.01.2024) [in Ukrainian].
4. On the approval of the Temporary procedure for the release of electric energy in conditions of shortage of fuel and energy resources: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 08.11.1996 No. 1361. *Database "Legislation of Ukraine"*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1361-96-%D0%BF#Text (Last accessed: 02.01.2024) [in Ukrainian].
5. On urgent measures to stabilize the financial situation of enterprises in the electric power industry: Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine, dated 24.03.1999 No. 441. *Database "Legislation of Ukraine"*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/441-99-%D0%BF/conv#o65 (Last accessed: 02.01.2024) [in Ukrainian].
6. On the approval of the Procedure for taking temporary emergency measures to overcome the consequences of prolonged disruption of the normal operation of the electricity market: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 08.13.2014 No. 372. *Database "Legislation of Ukraine"*. URL: http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/372-2014-п (Last accessed: 02.01.2024) [in Ukrainian].
7. Lir, V., & Bykonya, O. (2015). Economic mechanisms of demand management on the electricity market. *Economist*, 2, 9–13. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/econ_2015_2_3 (Last accessed: 02.01.2024) [in Ukrainian].
8. Zamulko, A.I., & Ishchenko, O.S. (2021). Peculiarities of using tariffs for interruption in the conditions of the electricity market of Ukraine. *Energy: economy, technologies, ecology*, 1, 98–107 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2021.242187
9. Kotsar, O., & Rasko, Y. (2023). Improvement of methodical and instrumental provision of demand management in liberalized electricity markets. *Technical electrodynamics*, 3, 68–79 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.15407/techned2023.03.068

10. Inflation report. (2023, January). *National Bank of Ukraine*. URL: https://bank.gov.ua/admin_uploads/article/IR_2023-Q1.pdf?v=4 (Last accessed: 02.01.2024) [in Ukrainian].
11. Kalinchyk, V., Rozen, V., & Skachok, A. (2012). Energy distribution method between the consumers. *Collection of scientific papers of the Kirovohrad National Technical University*, 25(2), 52–57. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkntu_2012_25(2)__11 (Last accessed: 02.01.2024) [in Ukrainian].
12. Camm, J.D., Cochran, J.J., Fry, M.J., Ohlmann, J.W., Anderson, D.R., Sweeney, D.J., & Williams, T.A. (2023). An Introduction to Management Science: Quantitative Approaches to Decision Making. 16th edition. Cengage Learning, 788 p.
13. Kuzmychev, A. (2021). Optimization methods and models. Modeling using MS Excel: a tutorial. K.: Lira-K Publishing House, 215 p. [in Ukrainian].
14. Ragsdale, C.T. (2022). Spreadsheet Modeling and Decision Analysis: a Practical Introduction to Business Analytics, ninth edition. Cengage Learning Inc., 908 p.
15. Baker, K. R. (2016). Optimization Modeling with Spreadsheets. Third edition. John Wiley & Sons, 356 p.
16. Kuzmychov, A., Chernetska, Y., & Shestakov, V. (2022). A search and sensitivity analysis of time optimal plans of energy resources supply using SolverTable add-in. *Data Recording, Storage & Processing*, 24, 2, 62–71 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.35681/1560-9189.2022.24.2.275103
17. Moroz, S., & Zyma, V. (2021). Price discrimination in the electricity market of Ukraine. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic sciences*, 6, 1, 163–171 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.31891/2307-5740-2021-300-6-27
18. On the approval of the Procedure for the organization of measurements of electric load on a regular day: Order of the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine dated 15.01.2008 No. 7 as of 06.04.2023. *Database "Legislation of Ukraine"*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0084-08#Text (Last accessed: 02.01.2024) [in Ukrainian].

DETERMINATION OF THE LIMIT VALUES OF ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION USING OPTIMIZATION MODELING

Anatolii Zamulko*, PhD (Engin.), Associate Professor, https://orcid.org/0000-0001-8018-6332
Yuliia Chernetska, PhD (Engin.), https://orcid.org/0000-0001-6821-3211
Anton Prasol, https://orcid.org/0009-0009-2743-3301
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03056, Ukraine
*Corresponding author: zamulko.anatolii@lll.kpi.ua

Abstract. *In the heating season of 2022/2023, as a result of the military aggression of the Russian Federation and targeted attacks on electric power facilities, a significant shortage of electric energy occurred in the Integrated power system of Ukraine. Restriction schedules and emergency disconnection of consumers were forcibly applied. In the conditions of such an unprecedented violation of the security of electricity supply, the problem of determining the limit values of electric energy and power consumption has gained new relevance for the electricity market participants. In this study, the problem of determining the optimal limit values of electricity consumption based on the criterion of maximum income from its sale to three groups of consumers was set and solved: "Critical infrastructure", "Households" and "Non-household consumers". The formation of the three specified groups is related to price discrimination in the electricity market and the need to supply critical infrastructure facilities without limits. The decision variables in the optimization model are proposed to be specified in fractions of the provision of electrical energy needs (unit fractions), which allows for establishing equal conditions regarding restrictions for all distribution system operators. To take into account the social significance of electric energy as a commodity, an additional constraint was included to the basic optimization model: the lower limit of the decision variable for the "Households" group. Approbation of the proposed optimization model was carried out using spreadsheet modeling in MS Excel on reported data on the results of electrical load measurements on regime days. The results of computational experiments are presented for the conditions of different values of the deficit of electric energy in the Integrated power system of Ukraine and different values of the additional constraint for the «Households» group, in particular, quantitative estimates of the consequences of the included constraints for the functioning of the electricity market. The proposed method of determining the limit values of electric energy consumption allows to formalize the procedure for decision-making according to predetermined rules and thereby achieve a fair distribution of limited resources.*
Keywords: electric energy consumption, shortage, limit value, optimization modelling, spreadsheet model.

Надійшла до редколегії: 22.01.2024